

## Ingeniería mecánica

# Estudio de degradación de descargadores de óxido de zinc tipo distribución

Henry Felipe Ibáñez Olaya\*

### Resumen

Un estudio experimental es llevado a cabo para determinar variaciones en las características eléctricas de los descargadores de ZnO ante el fenómeno de degradación. Las variables eléctricas examinadas son el coeficiente de no linealidad del descargador y la potencia disipada. Existen otros métodos para determinar el estado de funcionamiento de un descargador como por ejemplo el estudio de la componente resistiva de la corriente de fuga en A.C., que en todo caso no será tenido en cuenta en el presente trabajo. Los ensayos de laboratorio se realizaron acelerando el proceso de degradación mediante aplicación de energía a las muestras y simulando un efecto degradatorio mediante la aplicación de calor. Los resultados obtenidos muestran variaciones en las variables eléctricas que pueden ser utilizadas a la hora de establecer un programa de revisión del estado de funcionamiento de los descargadores de sobretensión en las redes eléctricas.

### Palabras Clave

Descargador de sobretensión, degradación, coeficiente de no linealidad.



\* Ingeniero Electricista de la Universidad Nacional de Colombia y Magíster en Ingeniería Eléctrica de la misma universidad. Especialista en Control y Automatización de Procesos Industriales de la Universidad de Los Andes. Profesor Universidad Antonio Nariño, adscrito a la Facultad de Ingeniería Mecánica, Electromecánica y de Automatización Industrial.

[heibanez@uan.edu.co](mailto:heibanez@uan.edu.co); [hfibanezo@gmail.com](mailto:hfibanezo@gmail.com)

## Abstract

A pilot study is carried out to determine the variations in the electrical characteristics of the surge arrester of ZnO due to the phenomenon of degradation. The electric variables considered are the coefficient of nonlinearity and the dissipated power by the surge arrester. There are other methods to determine the operational status of an unloader as is the study of the resistive component of the leakage current in AC, not be taken into account in this work. Laboratory tests were conducted by accelerating the degradation process through implementation of energy to the samples and simulating an degradation effect by applying heat. The results show variations in the electric variables that can be used to establish a program for reviewing the operational status of the surge arrester in electric networks.

## Key Words

Unloader of sobretension, degradation, coefficient of not linearity.

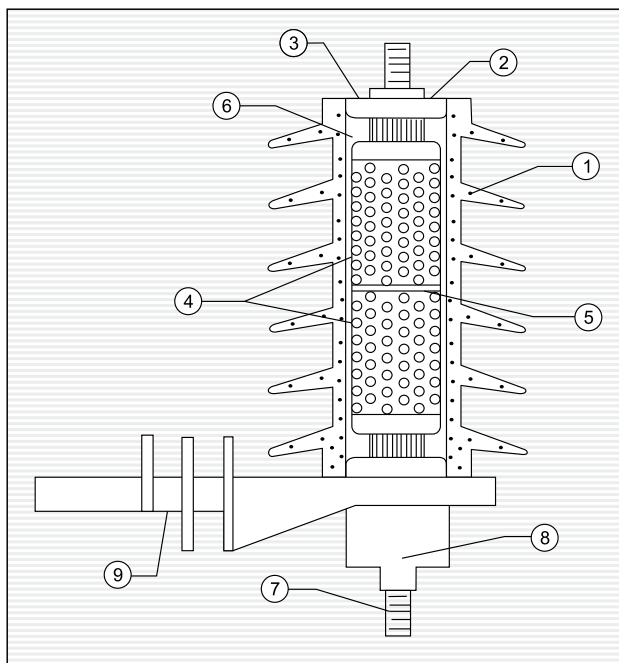
## Introducción

Los descargadores de sobretensión juegan un papel importante en la protección de equipos y sistemas eléctricos de distribución de energía desde que empezaron a ser utilizados con tal fin. En un comienzo, se utilizaron descargadores con gaps colocados en serie con los elementos activos del descargador (carburo de silicio) e inclusive existen descargadores de óxido metálico (ZnO) que cuentan con ésta misma forma constitutiva y que los mantiene desconectados de la red de energía bajo condiciones de operación normal. Con la eliminación de los gaps y un desarrollo del comportamiento del material del elemento activo ante sobretensiones de diferentes orígenes, un nuevo problema se presentó.

Sin la presencia del gap en los descargadores de ZnO, la tensión normal de operación del equipo o de la red de energía donde se instala el descargador es continuamente aplicada sobre el elemento de óxido de zinc lo que produce circulación continua de corriente del orden de cientos de microamperios que si bien no producen daño al descargador de sobretensión, también se encuentra expuesto continuamente a grandes corrientes como las que aparecen ante sobretensiones temporales del sistema por fallas eléctricas o efectos de ferorresonancia, produciendo calentamiento en el óxido metálico. Si la sobretensión temporal es lo suficientemente grande en magnitud como en duración, la temperatura se puede incrementar lo suficiente para producir una falla de funcionamiento del descargador por fuga térmica.

Un descargador de sobretensión debería comportarse, la mayor parte de su vida útil, como un perfecto aislante a una tensión normal línea–tierra. Sólo por un número dado de veces y por tiempos cortos, debe exhibir una baja resistencia y conducir a tierra la carga asociada a una sobretensión, manteniendo un nivel de protección sobre el equipo o la red de energía donde se encuentre instalado y regresando a su condición inicial de perfecto aislante. Lo anterior no se presenta puesto que existe una pequeña corriente llamada corriente de fuga a la tensión normal de operación y que bajo condiciones de operación extrema presentadas repetitivamente o en un lapso de tiempo largo, puede ocasionar un incremento en ésta corriente de fuga y en las pérdidas de potencia asociadas con ella junto con el incremento de la temperatura, entre otros. Estos cambios constituyen la degradación del descargador de óxido de zinc, y la posibilidad de reconocerlos constituye el objetivo del presente trabajo.

**Figura 1.**  
Diagrama  
esquemático  
de un  
descargador  
de ZnO.  
1. Carcaza  
exterior,  
2. Terminal,  
3. Cobertura en  
acero inoxidable,  
4. Pastillas de  
ZnO, 5. discos  
de contacto,  
6. Recubrimiento  
en fibra de  
vidrio,  
7. Terminal,  
8. Seguridad  
térmica,  
9. Base de  
conexión.



### Generalidades de los descargadores de óxido de zinc (ZnO)

Los descargadores de sobretensión de óxido de zinc se han constituido en el principal dispositivo de protección contra sobretensiones transitorias que se pueden presentar en un sistema eléctrico, evitándose daños a equipos y dispositivos pertenecientes a subestaciones eléctricas, centros de generación de energía, líneas eléctricas de distribución y transmisión, entre otros.

El principal componente de los descargadores de óxido de zinc (ZnO) lo constituyen las pastillas del mismo material (en la Figura1 el número 4), así como otros óxidos metálicos tales como Bi, Sb, Co, Mn, Ni, Cr, que, debido a su característica no lineal tensión–corriente, permiten limitar el nivel de tensión en un sistema o equipo eléctrico cuando grandes corrientes (del orden de cientos de amperios o miles de amperio) son inyectadas en el sistema debido a impactos directos o indirectos de descargas eléctricas, siendo a su vez un camino de conducción de ésta a tierra, o en

la eventualidad de sobretensiones temporales debidas a fallas eléctricas en los sistemas de conducción de energía.

Los descargadores de sobretensión tienen aplicaciones en sistemas eléctricos D.C. y A.C., en un amplio rango de tensiones que pueden variar desde algunos voltios hasta cientos de miles, al igual que su capacidad de absorción de energía que puede ir de pocos Julios hasta miles de ellos.

En la Figura 2 se puede apreciar la característica tensión–corriente para un descargador de ZnO. Luego, se distinguen tres zonas de funcionamiento en la pastilla de ZnO:

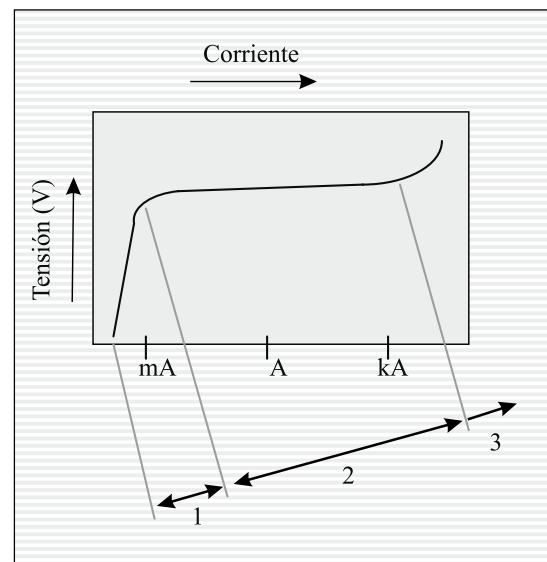
Zona 1. Es una región lineal, llamada también región de MCOV<sup>1</sup>, de baja corriente, que se extiende aproximadamente hasta una corriente de 1mA. En ella se encontrará trabajando el descargador en condiciones normales, por lo que toma interés cuando se hace referencia a estudios de degradación de descargadores de ZnO.

Zona 2. Se conoce como la zona no lineal del dispositivo, o región de TOV<sup>2</sup>, ya que para pequeños incrementos en el valor de tensión se producen grandes variaciones en los niveles de corriente conducida por el descargador, de manera que éste se ve sometido a manejar niveles de energía mayores a los exigidos en la zona 1, dependiendo del tiempo de duración de la sobretensión.

La relación entre tensión y corriente en ésta zona se puede expresar como:

$$I = k \times V^{\alpha} \quad \text{Ecuación 1}$$

donde I y V son la corriente y tensión que presenta el descargador, k una constante del material y  $\alpha$  es conocido como el coeficiente de no linealidad. Entre mayor sea el valor de  $\alpha$  la respuesta del descargador es mejor y se cuenta con un mejor nivel de protección, teniéndose valores típicos



**Figura 2.**  
Característica  
general  
tensión–corriente  
para una pastilla  
de ZnO en escala  
logarítmica.

<sup>1</sup> MCOV o COV es la Máxima Tensión de Operación Continua o Tensión de Operación Continua, respectivamente; y es el máximo valor de tensión rms que puede ser aplicado continuamente entre los terminales del descargador, sin causarle la inestabilidad térmica asociada a falla por fuga térmica.

<sup>2</sup> TOV: Siglas en inglés para Sobretensiones Temporales.

promedio para descargadores modernos de 25 [1], [2], [3]. Éste valor de  $\alpha$  se puede hallar experimentalmente en característica del descargador o de la pastilla a través de la expresión:

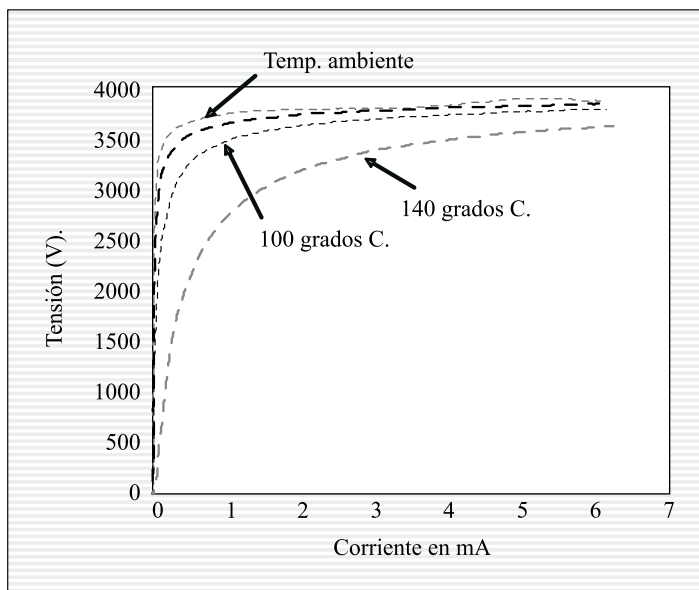
$$\alpha = \frac{\log(I_2/I_1)}{\log(V_2/V_1)} \quad \text{Ecuación 2}$$

siendo  $I_2$ ,  $V_2$  e  $I_1$ ,  $V_1$  dos pares de puntos de la curva tensión–corriente.

Zona 3. Zona de altas corrientes (tipo rayo) que comprende desde corrientes de 1kA en adelante y donde el crecimiento de la tensión es más alto con respecto a la corriente que a la región no lineal, siendo nuevamente la relación tensión–corriente lineal tal y como se presenta en la zona 1.

### Causas de degradación de los descargadores de ZnO

**Figura 3.** Simulación de degradación de una pastilla de ZnO. Variación de la característica tensión–corriente en D.C. para un descargador de ZnO debido a la variación de su temperatura.



La degradación de los descargadores de óxido de zinc (ZnO) en servicio, puede ser agrupada dentro de tres tipos, básicamente [5]: degradación bajo aplicación continua de tensión A.C., degradación causada por impulsos de corriente y degradación debida a reacciones químicas con el ambiente. Es importante diferenciar la degradación de una falla, ya que la primera se encuentra relacionada con variaciones en algunas características eléctricas de los descargadores que no impiden a éstos seguir operando, mientras que una falla es una condición en la cual el descargador sufre un daño físico (ruptura o fundición) que genera una condición de no funcionamiento y por ende desprotección del

equipo o sistema al cual se encuentra conectado. En un descargador se puede presentar aisladamente uno u otro fenómeno o la condición de falla como una consecuencia de la degradación del mismo.

La degradación de los descargadores de ZnO es un proceso lento si éste se encuentra en condiciones de tensión y temperatura normales de funcionamiento. Es debido a lo anterior que se hace necesario establecer un proceso de ace-

lación de la degradación mediante la aplicación de energía al descargador, que permita estudiar los cambios presentados en sus características eléctricas. Estos cambios se ven reflejados en un aumento de la magnitud de corriente a un mismo nivel de tensión y por consiguiente en un incremento en la potencia disipada y la temperatura del elemento.

En la Figura 3 se pueden apreciar los cambios en la característica tensión–corriente, cuando a una muestra de ZnO se le ha aplicado calor para aumentar su temperatura de operación y de ésta manera simular una condición de degradación.

Se puede estimar cuánta energía ha sido inyectada a un descargador de sobretensión mediante la siguiente expresión:

$$\Delta T = \frac{\int (V(t) * I(t) dt)}{m * C_p} \quad \text{Ecuación (3)}$$

donde

- m : masa del descargador de ZnO (gr)
- $C_p$  : Calor específico del ZnO ( $0.457 \frac{J}{g \cdot K}$ )
- $\Delta T$  : Incremento en temperatura ( $^{\circ}K$ )

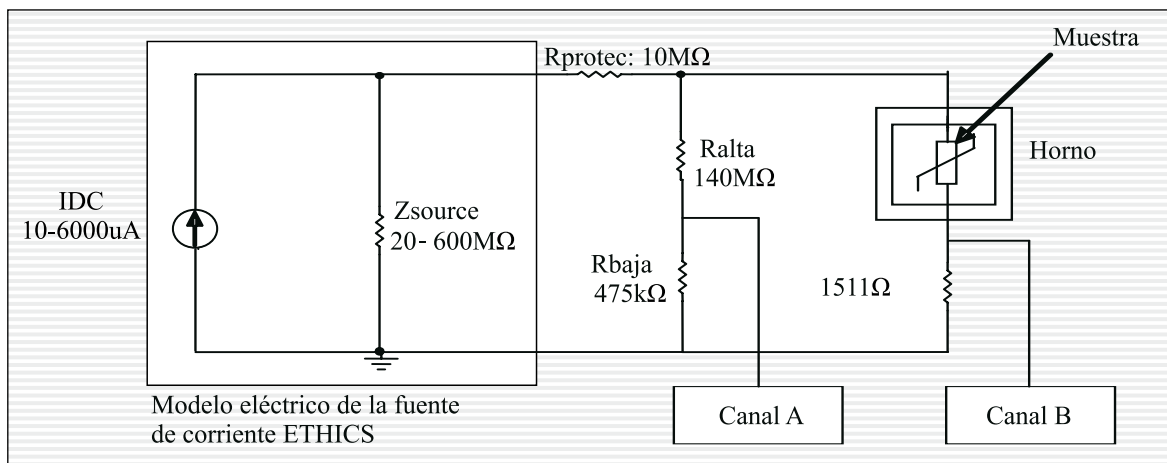
### **Métodos de diagnóstico para determinar estado de degradación en los descargadores de ZnO**

Los siguientes son los parámetros eléctricos tenidos en cuenta para encontrar un indicador que permita evaluar la condición de degradación en la que se encuentra:

- Coeficiente de no linealidad.
- Potencia y energía.

Para lo anterior se tomaron doce muestras pertenecientes a tres descargadores completos de una tensión nominal de  $12kV_{rms}$  y un MCOV de  $10.2kV_{rms}$ , con una corriente de descarga de 5kA, 8/20us, cada uno, y un valor de  $1.1kJ/kV_{MCOV}$ . Las doce pastillas de ZnO pertenecen a descargadores nuevos, no usados, con el fin de tener un referente y poder comparar sus comportamientos cuando sean aplicados procedimientos para lograr alguna condición de degradación. Estas muestras se enumeraron del 1 al 12 para diferenciarlas.

Con base en lo anterior, se tiene que cada una de las muestras estaría en capacidad de absorber una energía de 2.8kJ, lo que significa que habría la necesidad de aplicar una cantidad mayor de ésta energía para poder apreciar una variación en el comportamiento de las pastillas de ZnO.



**Figura 4.**  
Esquema del montaje utilizado en la caracterización de los descargadores de ZnO.

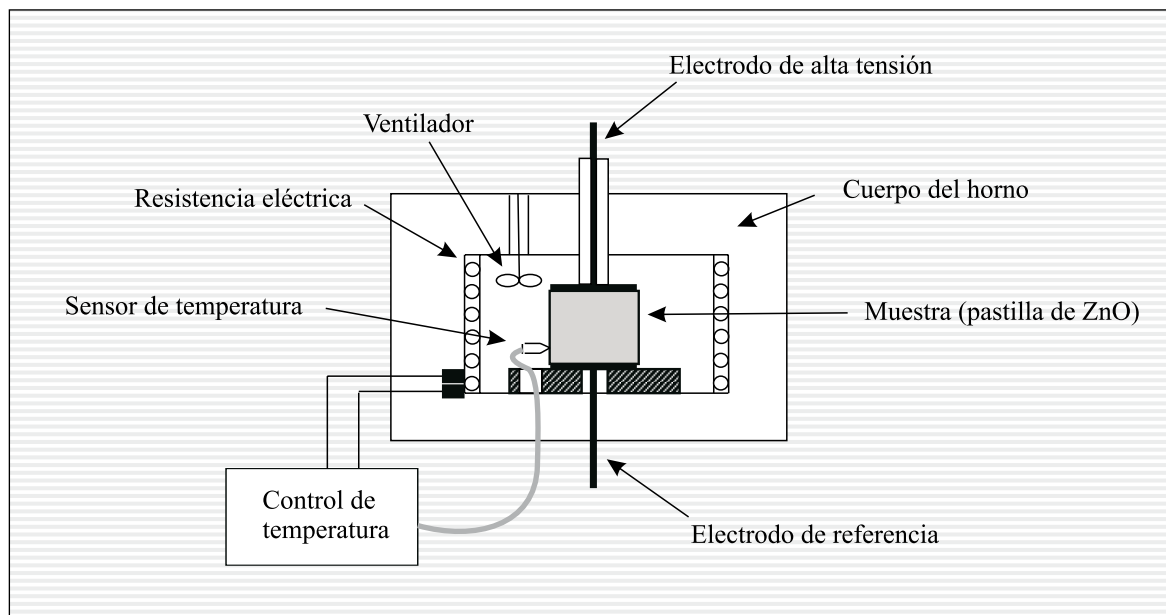
Para determinar la característica tensión–corriente se utilizó la fuente de corriente D.C. de Extra Alta Impedancia “ETHICS” (Extra High Impedance Current Source) [6] que fue desarrollada e implementada en el Laboratorio de Alta Tensión de la Universidad Nacional, sede Bogotá. Una descripción del modo de funcionamiento y de las características principales que presenta la fuente de Extra Alta Impedancia se puede consultar en las referencias [1], [6], [7].

En la Figura 4 se presenta el esquema del montaje utilizado para la caracterización de las muestras, en donde se presenta el modelo eléctrico de la fuente de corriente ETHICS.

Adicionalmente, se construyó un horno eléctrico que elevara la temperatura de las muestras de ZnO, y mantuviera ésta en un nivel constante, mientras se energizaran las muestras y se tomaran las lecturas correspondientes de tensión y corriente. En la Figura 5 se muestra la disposición física del horno implementado.

Se caracterizaron las doce muestras de ZnO en un rango de corriente D.C. que va desde los 10uA hasta los 5mA en tiempos que no sobrepasaron los 10 segundos por prueba, con el fin de no variar en más de 10°C la temperatura incrementada en la muestra. La prueba de laboratorio se realizó tres veces por muestra para descartar la intervención de la prueba sobre los resultados obtenidos. Las mediciones se llevaron a cabo para cuatro diferentes temperaturas: temperatura ambiente (22.5°C), 60°C, 100°C y 140°C; excepto para tres muestras escogidas al azar: la número 6, 11 y 12, las cuales, luego de obtenerse su característica tensión–corriente a temperatura ambiente, fueron sometidas a ciclos de degradación mediante inyección de energía con una magnitud correspondiente a tres veces su capacidad de absorción.





**Figura 5.**  
Diagrama esquemático del horno eléctrico utilizado para la realización de las pruebas.

Cada ciclo de degradación consistió en aplicar 1.5 veces la tensión MCOV de cada una de las tres muestras, hasta que éstas alcanzaran una temperatura de  $147^{\circ}\text{C}$ , correspondiente al valor de  $8.9\text{kJ}$  de acuerdo con la expresión de la ecuación 3. Una vez alcanzada la temperatura, la muestra se desenergizó hasta ser retomada la temperatura ambiente para luego volver a repetir la operación.

En total, fueron veinte ciclos de degradación para cada una de las tres muestras seleccionadas al azar. Al final del experimento se alcanzó una energía neta inyectada por muestra de  $178\text{kJ}$ .

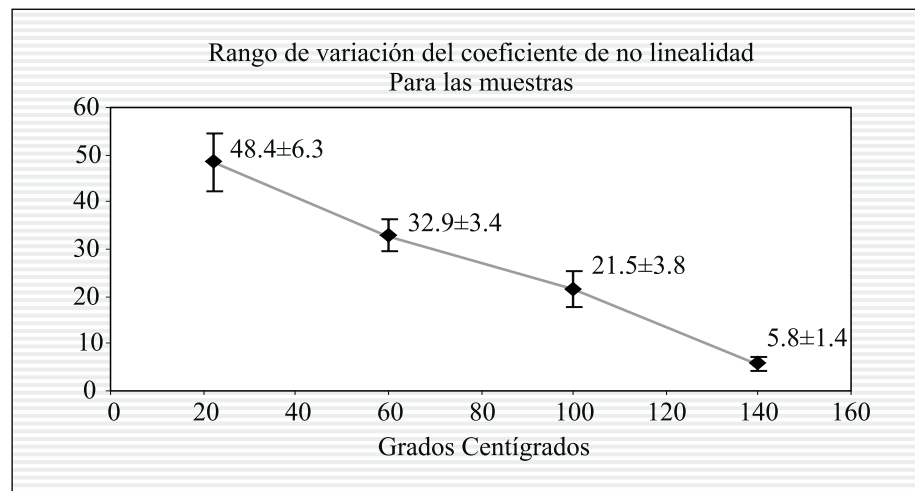
La medición de temperatura que se realizó sobre la superficie de las muestras se llevó a cabo mediante un termómetro digital marca Fluke 16, con un rango de medición de  $-10^{\circ}\text{C}$  a  $400^{\circ}\text{C}$ , con una resolución de  $0.1^{\circ}\text{C}$  y una precisión de  $\pm 1.0\% + 0.8^{\circ}\text{C}$ , utilizando termocupla tipo K. Los registros de tensión y corriente se llevaron a cabo mediante los dos canales de trabajo de un osciloscopio Fluke 105 serie II, de un ancho de banda de  $100\text{ MHz}$ , resolución vertical de 8 bits y una longitud de registro de 512 muestras.

Las pruebas se llevaron a cabo en un rango de temperatura ambiente de  $19.5^{\circ}\text{C}$  a  $25.2^{\circ}\text{C}$  y una humedad relativa entre 42% y 55%.

**Coefficiente de no linealidad.** Con base en lo anterior, se tiene el comportamiento del coeficiente de no linealidad en función a la temperatura, mostrado en la Figura 6 para las nueve muestras trabajadas.



**Figura 6.**  
Variación del  
coeficiente de no  
linealidad  $\alpha$  de los  
descargadores de  
ZnO ante cambios  
de temperatura a una  
corriente de 5mA.

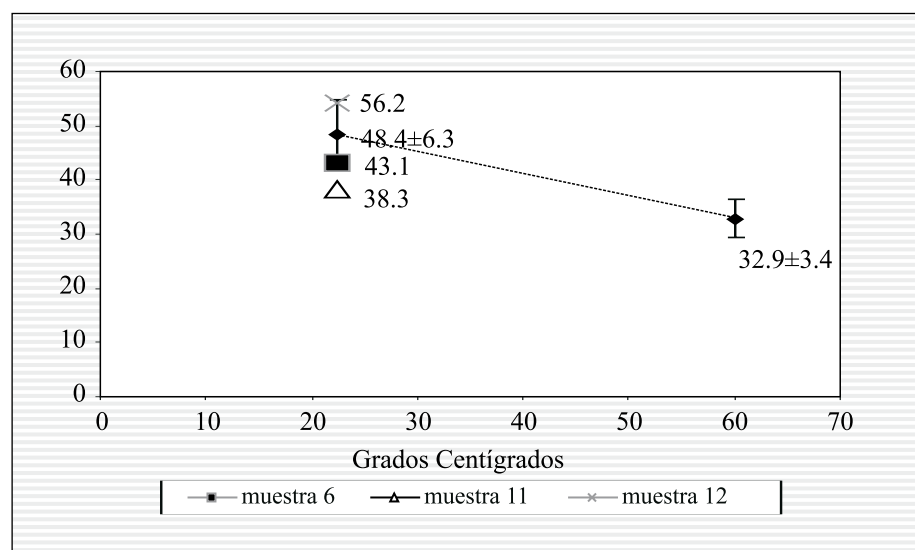


Del comportamiento del coeficiente de no linealidad con la temperatura, se puede apreciar, siguiendo la ecuación, un decremento en el valor promedio para las muestras, siendo T temperatura en °C :

$$\alpha = -0.354 * T + 5.2 \quad \text{Ecuación 4}$$

Así, se tiene una variación aproximadamente del 12% a partir de la temperatura ambiente hasta una temperatura de 140°C en el valor de  $\alpha$ . La Figura 7 ilustra el comportamiento de los valores de  $\alpha$  encontrados para las pastillas número 6, 11 y 12 de ZnO a las cuales se les aplicó los ciclos de degradación, en comparación con los presentados por las demás muestras a una temperatura ambiente.

**Figura 7.**  
Valores de  $\alpha$  para  
las muestras 6, 11 y  
12 con relación al  
rango de medición  
del coeficiente de  
no linealidad para el  
resto de las muestras  
de ZnO

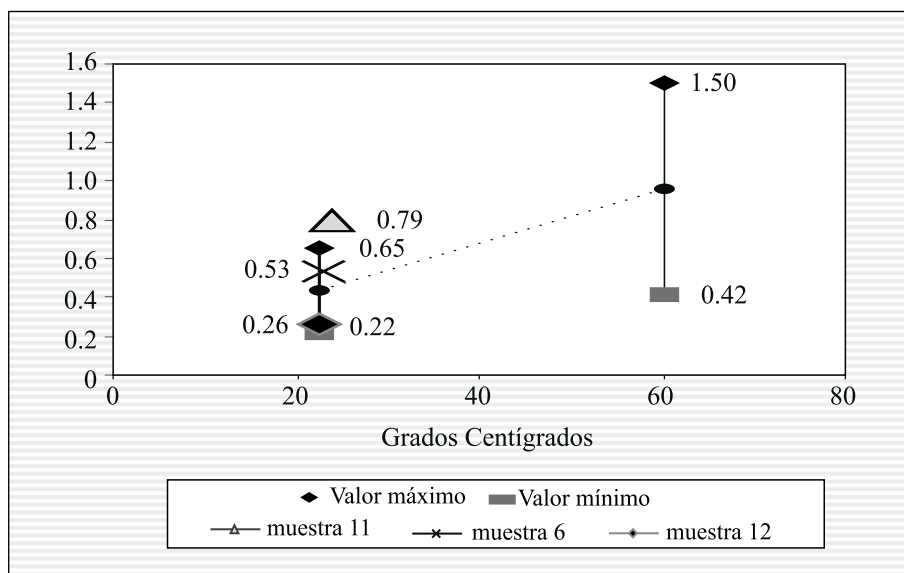


Sólo la muestra 12, a una temperatura ambiente, se halla dentro del rango de alfa encontrado para las muestras, estando por fuera las pastillas 6 y 11. Lo anterior, representa un signo de degradación ya que los valores de alfa cambiaron en la pastilla 6 un 10.9%, en la pastilla 11 un 4.5% y en la pastilla 12 un 4.6% en comparación con los valores presentados antes de haber sido aplicados los ciclos de degradación.

Empleando la ecuación 4 obtenida, se puede deducir que la muestra 11 con el valor de alfa a temperatura ambiente hallado después de haberse sometido a los ciclos de degradación, se encuentra en una posición tal que la variación sufrida en su valor de alfa se hubiese podido simular aplicando calor a la muestra hasta llevarla a una temperatura de 49°C. Respecto a la muestra 6 se tiene que su valor de alfa se hubiese podido simular utilizando una cantidad de calor tal que la muestra hubiera alcanzado una temperatura de 35.5°C.

**Potencia disipada.** Al estudiar la potencia disipada por las tres muestras de ZnO, antes y después de aplicados los ciclos de degradación, se encuentra que las muestras número 6 como la número 11 presentan una tendencia ascendente en el valor de su potencia disipada, ya que antes de aplicar los ciclos de degradación el valor de potencia correspondía a 0.34W para la muestra 6 y de 0.61W para la 11. Después de la aplicación de los 20 ciclos, la potencia disipada es de 0.53W para la muestra 6 y de 0.79W para la 11, registrándose un incremento de la potencia en un orden del 55.8% y del 29.5%, respectivamente. Con respecto a la muestra 12, no se encontró prácticamente ningún signo de degradación, ya que el comportamiento de la potencia disipada permanece casi constante, variando de 0.23W a 0.26W al terminarse de aplicar los ciclos de degradación.

Al observar la Figura 8 con más detalle en relación a la temperatura ambiente, el comportamiento de las tres muestras a las cuales fue aplicado el ciclo de degradación, se tiene que la



**Figura 8.** Comparación del rango de variación de la potencia disipada por las muestras y por las pastillas de ZnO número 6, 11 y 12.

potencia disipada por la muestra 11 se sale del rango en el que se encuentra la totalidad de las muestras de ZnO, ya que disipa una potencia de 0.79W después de empleados los ciclos de degradación.

Con respecto a la muestra 6, se puede observar que, aunque su potencia disipada aumenta después de la aplicación de los ciclos de degradación, su valor se encuentra dentro del rango de disipación de potencia de todas las muestras medidas. La muestra 12 es la más estable debido a su mayor valor de coeficiente de no linealidad y menor potencia disipada.

El comportamiento de la potencia disipada por las muestras se puede expresar en la siguiente ecuación, obtenida mediante regresión polinómica siendo T el valor de temperatura en grados centígrados:

$$P = 2 * 10^{-5} * T^3 - 3.2 * 10^{-3} * T^2 + 0.175 * T - 2.093 \text{ [W]} \quad \text{Ecuación 5}$$

Con base en la ecuación 6, se tiene que la muestra 11 —con su valor de potencia disipada a temperatura ambiente después de haber sufrido los ciclos de degradación— se comporta de manera similar a cuando ha sido sometida a una temperatura de 48°C, mientras que la muestra 6, que se encuentra dentro de los rangos de valores de potencia presentados por las muestras para temperatura ambiente, como si simulara una temperatura de 31°C, es decir, se presenta una reducción en la capacidad de soportar esfuerzos térmicos.

## Conclusiones

Es indudable la importancia de los descargadores de sobretensión en los sistemas eléctricos de media y alta tensión, sin olvidar los sistemas de baja tensión y sistemas electrónicos y de telecomunicaciones, en cuanto a protección se refiere. Por ello se hace necesario que éstos presenten un funcionamiento continuo en las redes y circuitos eléctricos sin presentar fallas. De aquí la importancia de saber determinar cuándo los descargadores de sobretensión se encuentran en un punto cercano de falla para reemplazarlo y no dejar desprotegida la red eléctrica.

La temperatura es un factor que influye en gran medida sobre el comportamiento de la característica tensión–corriente y se constituye en una manera de simular la degradación de los descargadores de ZnO. El aumento de temperatura desde 22.5°C hasta 140°C aplicado sobre las muestras de ZnO, permitieron simular niveles de degradación como los producidos por la aplicación de niveles de energía que cambian el punto de operación del descargador.

Al revisar los métodos de estudio de degradación de descargadores de ZnO, se aprecia que es posible determinar un grado de degradación según la variación del valor del coeficiente de no linealidad y la medición del valor de potencia disipada por los descargadores.

## Bibliografía

- [1] GAMBOA, L., ALARCÓN, A., Martínez, J. “Caracterización de descargadores de sobretensión usando una fuente de corriente de alta impedancia”, tesis presentada a la Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica para optar al grado de Ingeniero Electricista. (2002).
- [2] RIVERA, S., NAVARRO, E. “Análisis de los modos de falla en los descargadores de ZnO en redes de distribución”, tesis presentada a la Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica para optar al grado de Ingeniero Electricista. (2001).
- [3] ZITNIK, M. *Numerical Modelling of Transients in Electric Systems*. Uppsala Dissertations from the Faculty of Science and Technology. (2001).
- [4] PAUL, D. “Power Distribution System Equipment Overvoltage Protection”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 30, No.5, September/October. (1994).
- [5] HEINRICH, C., HINRICHSSEN, V. “Diagnostics and Monitoring of Metal-Oxide Surge Arrester in High-Voltage Networks. Comparison of Existing and Newly Developed Procedures”, *IEEE Transaction on Power Delivery*, Vol. 16, No.1, pp. 138-143, January. (2001).
- [6] ROMAN, F. “A New Extra High Impedance Current Source “ETHICS””, *Mundo Eléctrico Colombiano*, Vol. 15, No. 45, Octubre-Diciembre, (2001). pp. 97-99.
- [7] ROMAN, F., ALARCÓN, A., GAMBOA, L. C., MARTÍNEZ, J. M. “A New Method to Obtain the Degradation of Surge Arresters Using an Extra High Impedance DC Current Source”, VII International Symposium on Lightning Protection, Curitiba (Brazil), (2003). pp. 328-331.
- [8] ZHU, H. “Investigation of On-Site Diagnostic Testing Techniques of MOSA”, M.Sc. Thesis University of Manitoba. (2000).